نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی
جلد ۳۵، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰، ص. ۱۷۸-۱۶۱

Journal of Agricultural Economics and Development
Vol. 35, No. 2, Summer 2021, p. 161-178

مقاله پژوهشی

ارزیابی ریسک کمبود آب با استفاده از مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای تعاملی (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی مرند)

جواد حسین زاد[1]*- مهری راعی[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۸

چکیده

همگام با افزایش جمعیت کره زمین و توسعه اقتصادی، مسئله آب و مشکل کم‌آبی در سال‌های اخیر یکی از چالشی‌ترین موضوعاتی است که به جهت درجه اهمیت و جایگاه اقتصادی آن بخش‌های متعددی را درگیر خود کرده‌است و بیش از پیش مورد توجه دولت‌ها و سازمان‌های تحقیقاتی بین‌المللی قرار گرفته‌است. این امر بر لزوم تخصیص بهینه این منابع برای ایجاد تعادل در توسعه اقتصادی-اجتماعی و صرفه‌جویی در مصرف آب تأکید می‌کند. بنابراین در این مطالعه ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای تعاملی برای تخصیص منابع آب کشاورزی توسعه داده شده و سپس با استفاده از نتایج این مدل به ارزیابی ریسک کمبود آب تحت شرایط عدم‌قطعیت پرداخته شد. چارچوب توسعه‌یافته می‌تواند انواع گزینه‌های تصمیم‌گیری را برای تجزیه و تحلیل مصالحه بین منافع سیستم و ریسک‌های مربوطه فراهم‌کند. علاوه‌براین، ارزیابی ریسک کمبود آب به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا شرایط ریسک کمبود آب در حالت‌های مختلف را در نظر بگیرند و بر اساس آن اقدامات مناسب در مدیریت مصرف و عرضه آب صورت پذیرد. این چارچوب برای بهینه‌سازی منابع آب کشاورزی محدوده مطالعاتی مرند واقع در حوزه آبریز رودخانه ارس که کل سطح شهرستان مرند (واقع در استان آذربایجان شرقی) را در بر می‌گیرد، برای افق زمانی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ اعمال شده‌است. مقایسه نتایج بهینه تخصیص و شرایط واقعی (موجود) مصرف آب کشاورزی، نشان می‌دهد تخصیص منابع آب با استفاده از مدل توسعه داده شده، موجب کاهش کمبود آب و تخصیص بیشتر و در عین حال کاراتر منابع آب در محدوده مطالعاتی شده و سود خالص سیستم را نیز افزایش می‌دهد. نتایج حاصل از ارزیابی ریسک کمبود آب در محدوده مطالعاتی مرند نشان می‌دهد که مطابق با طبقه‌بندی ریسک در این مطالعه، ریسک کمبود آب در این محدوده مطالعاتی در سطح بالا قرار دارد که بیانگر سطح ریسک جدی و بحرانی است. لذا در صورت ادامه روند فعلی تخصیص و بهره‌برداری منابع آب، با توجه به تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت و تغییر میزان احتمال آب دردسترس در سال‌های آینده، این سطوح ممکن است تغییر وضعیت داده و به سطح ریسک خیلی بالا (غیرقابل تحمل) نیز برسد که ادامه این روند کلیه سرمایه‌گذاری‌ها و مبانی اقتصادی این محدوده مطالعاتی را تهدید می‌کند. در مجموع نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که وضع موجود بهره‌برداری در این محدوده در شرایط نامناسبی قرار دارد و در صورت ادامه روش‌های مدیریتی فعلی، منجر به افزایش بیش از حد بهره‌برداری از منابع آب به خصوص آب زیرزمینی خواهد شد که این امر افزایش بیلان منفی آبخوان را به دنبال خواهدداشت. بنابراین پیشنهاد می‌شود در سیاستگذاری‌ها و مدیریت منابع آب، روش‌های علمی جدید جایگزین روش‌های مدیریتی ناکارا و کم بازده شوند. استفاده از تکنولوژی‌های صرفه‌جویانه در مصرف آب و همچنین تغییر الگوی کشت به سمت کاشت گیاهان مقاوم به کم آبی در برخی مناطق، از دیگر اقدامات موثر در مدیریت ریسک منابع آب در محدوده مطالعاتی به شمار می‌روند.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی ریسک، ارزیابی جامع فازی، برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای تعاملی، عدم‌حتمیت، مدیریت منابع آب

مقدمه

در دهه‌های اخیر مسائل مربوط به مناقشات تخصیص آب در بین کاربران رقیب به دلیل کاهش دسترسی به آب و پایین آمدن کیفیت آن، که با توسعه اقتصادی اجتماعی و امنیت غذایی مردم تداخل دارد، مورد نگرانی بسیاری از کشورها قرار گرفته است. با توجه به میزان منابع آب و سرانه مصرف، ایران از جمله کشورهایی است که در سال ۲۰۲۵ در گروه کشورهای مواجه با کمبود فیزیکی آب قرار خواهد

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشیار و دانشجوی دکتری گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(*- نویسنده مسئول: Email: J.hosseinzad@tabrizu.ac.ir)

DOI: 10.22067/JEAD.2021.69061.1017

گرفت (۱۴). به عبارت دیگر درصــورت ادامه روند فعلی مصــرف آب، حتی با بالاترین راندمان و بهره‌وری ممکن در مصرف آب، برای تأمین نیازهای بخش‌های مختلف مخصـوصاً بخش کشاورزی، آب کافی در اختیار نخواهد داشــت. بنابراین مدیریت منابع آب و تخصــیص بهینه منابع آب آبیاری کشاورزی موجود برای توسعه کشاورزی باید در سطح ملی و منطقه‌ای مورد توجه قرار گیرد. به هرحال انواع عدم‌حتمیت در اجزاء سیستم منابع آب (WRS)[1] وجود دارد که با یکدیگر ارتباط دارند که منجر می‌شــوند تخصــیص بهینه منابع آب آبیاری کشــاورزی در شــرایط واقعی چالش برانگیزتر شــود. بنابراین لحاظ عدم‌حتمیت در روش‌های سنتی بهینه‌سازی یک روش موثّر برای انعکاس پیچیدگی و واقعی کردن سیستم تخصیص منابع آب کشاورزی است (۱۹ و ۳۲).

در ســال‌هـای اخیر تعدادی از مطالعات به تخصــیص منابع آب کشــاورزی با لحاظ عدم‌حتمیت پرداخته‌اند (۲۷، ۵، ۱۶، ۱۷، ۳۶، ۳۰، ۱۱ و ۲۵). از بین این مدل‌ها، رهیافت برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای غیردقیق (ITSP)[2] در مســائـل مـدیریتی منـابع آب، به عنوان یک تکنیک موثّر در رابطه با عدم‌حتمیت شـناخته شده‌است (۲۱، ۲۲ و ۷). در مدل ITSP پارامترهای تصـادفی (مانند رواناب و بارندگی) با اعداد بازه‌ای بیان می‌شـوند، درحالی‌که در مســائل واقعی حد پایین و بالای بازه را نمی‌توان به‌صورت مقادیر قطعی به‌دست آورد، بلکه ممکن است به‌صـورت متغیرهای تصـادفی با توزیع احتمال مشـخص فرض شوند. علاوه‌براین ITSP بر این فرض استوار است که تصمیم‌گیرنده ریسک خنثی اســت و بنابراین به ســختی می‌تواند قابلیت اطمینان رضــایت ســیســتم یا ریســک نقض محدودیت‌های ســیســتم را در شــرایط عدم‌قطعیت نشــان دهد. در نتیجه وقتی تصــمیم‌گیرنده ریســک‌پذیر باشـد، ITSP ممکن است غیرقابل اجرا شود (۳). تکنیک برنامه‌ریزی محدودیت شــانس (CCP)[3]، که مســتلزم آن اســت که محدودیت ها تحت سـطوح احتمال مشـخصی برآورده شوند، قادر به رفع مشکلات فوق اســت (۱۰). از طرف دیگر ITSP در منعکس‌کردن ریســک‌های بالقوه‌ای که مرتبط با تابع هدف تصـادفی می‌باشـد نیز ناکارآمد اســت (۳۴). در چنین مواردی، برای لحاظ ضرایب تصادفی که در تابع هدف وجود دارد می‌توان از معیار کاتااوکا[4] برای تبدیل هدف تصادفی به یک تابع معادل قطعی اســتفاده کرد (۱۵). بنابراین یک رویکرد بالقوه در رابطـه با این مســائل، ادغام ITSP با CCP و معیار کاتااوکا در یک چارچوب جامع تخصـیص منابع آب کشــاورزی با در نظرگرفتن کامل پارامترهای تصـادفی و ریســک تخطی آب دردسترس در سیستم‌های کشاورزی است.

تجربه نشـان داده اسـت که مشـکل کمبود آب پس از تخصیص بهینـه منـابع آب می‌توانـد تا حدودی مرتفع گردد، اما هیچگاه به‌طور کامل حل نمی‌شود. کمبود آب کشاورزی در مقیاس کوچک، موجب از دسـت دادن منافع سـیسـتم می‌شـود، اما اگر کمیابی شـدت پیدا کند، اثرات زیانبار آن از کاهش منافع سـیسـتم به اختلال در سیستم منجر می‌شـود (۱۸). به عبارت دیگر، کمبود آب دردسترس منجر به ریسک اقتصـادی در فعّالیت‌های مختلف تولیدی خواهد شد. بنابراین، ارزیابی کمّی ریســک کمبود آب کشــاورزی که ناشــی از محدود بودن آب دردسـترس می‌باشـد، برای منعکس‌کردن شـدت اختلال در سـیسـتم کشاورزی، ارائه مبنایی برای تخصیص مناسب و استفاده موثّر از منابع آب و همچنین برای جلوگیری از آسیب‌های جدّی که در نتیجه کمبود آب برای منطقه به‌وجود می‌آید، بســیار بااهمیت اســت. با این وجود مطالعات محدودی در خصوص ارزیابی ریسک کمبود آب کشاورزی بر اسـاس مدل‌های بهینه‌سـازی تحت شـرایط عدم‌قطعیت گزارش شده اسـت. به عنوان مثال گو و همکاران (۶) به ارزیابی ریسک کمبود آب ناشــی از انحراف و انتقال آب از مخزن دانجیانگکو[5]، که بخشــی از پروژه انتقـال آب از جنوب بـه شــمال در چین می‌باشــد، پرداختند. شــاخص‌های ارزیابی ریســک مانند درجه ریســک، قابلیت اطمینان، برگشــت‌پذیری، آسـیب‌پذیری و سـازگاری برای دو افق برنامه‌ریزی (۲۰۱۵ و ۲۰۳۰) محاسـبه شـد. نتایج نشـان داد که در صـورت اتمام پروژه انتقال آب از جنوب به شـمال، بعد از سال ۲۰۳۰، ریسک کمبود آب در سطح ریسک قابل قبول خواهد شد. صفوی و گل‌محمدی (۳۱) با اسـتفاده از معیارهای اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری فازی به ارزیابی عملکرد سـیسـتم برنامه‌ریزی حوضـه آبریز زاینده‌رود تحت ســناریوهای مختلف پرداخته و شــاخص پایداری حاصــل از معیارهای فازی را با شـاخص پایداری حاصـل از معیارهای کلاسـیک مقـایســـه کردند. نتایج مطالعه از عملکرد مطمئن‌تر، محســوس‌تر و حقیقی‌تر روابط توسعه داده‌شده فازی به واقعیت موجود حکایت دارند.

مرور ادبیات حاکی از آن اسـت که در اغلب مطالعات به تخصیص منابع آب با اسـتفاده از روش‌های مختلف پرداخته شده ولی به ارزیابی ریســک کمبود آب توجه نشــده اســت. بنابراین هدف از این مطالعه توســعـه چارچوبی مبتنی بر عدم‌حتمیت برای تخصــیص منابع آب کشـاورزی و محاسـبه مقادیر کمبود آب پس از تخصـیص و همچنین ارزیابی ریسـک کمبود آب کشـاورزی اسـت. چارچوب توسعه‌یافته در یـک مطـالعـه موردی (محـدوده مطالعاتی مرند) اجرا می‌شــود. این محدوده مطالعاتی در حوزه آبریز رودخانه ارس واقع شده که کل سطح شهرستان مرند واقع در استان آذربایجان شرقی را در بر می‌گیرد (۳۳). بـا توجـه بـه کمبود بـارش ســالانـه و رواناب ســطحی در منطقه، بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در این محدوده بسیار متداول بوده و همین مسـاله باعث افت سطح آب زیرزمینی در این منطقه شده است.

1- Water resources system
2- Inexact two-stage stochastic programming
3- Chance constrained programming
4- Kataoka’s criterion
5- Danjiangkou reservoir

این امر منجر به عدم تعادل بین تغذیه و تخلیه آبخوان شده و آثار زیست‌محیطی متعددی مانند پیشروی آبهای شور، فرونشست زمین، کاهش آب‌دهی چاه‌ها، خشک‌شدن قنوات و چشمه‌ها را به همراه داشته‌است. ادامه این روند موجب تخریب سیستم منابع آبی شده و به پایداری زیست‌محیطی و اکولوژیکی آسیب جدی وارد خواهد شد. لذا برای کاهش بحران‌های زیست‌محیطی و زیان‌های اقتصادی ناشی از کمبود آب، مدیریت منابع آب و ارزیابی ریسک کمبود آن در این محدوده باید مورد توجه قرارگیرد. آگاهی از میزان و شدت ریسک وارده بر سامانه می‌تواند راهنمای بسیار مناسبی در تخصیص بهینه منابع و کاهش خسارات وارده در این شرایط باشد.

مواد و روش‌ها

تخصیص بهینه منابع آبی به دلیل عدم‌حتمیت‌های مختلفی که در سیستم منابع آب (WRS)[1] وجود دارد، بسیار چالش برانگیز است. به عنوان مثال می‌توان به تغییرات زمانی و مکانی آب دردسترس و تقاضای آب به دلیل پارامترهای مختلف تصادفی مانند بارندگی، تبخیر و تعرق و سایر شرایط آب و هوایی اشاره کرد.

در مسائل واقعی و در سیستم منابع آب، عدم حتمیت‌ها می‌توانند به صورت بازه‌ای و تصادفی بیان شوند. به عنوان مثال، شدت جریان آب (عرضه آب) ممکن است به صورت یک متغیر تصادفی در هر دوره برنامه‌ریزی در نظر گرفته شود که این عدم حتمیت را می‌توان با مدل برنامه‌ریزی محدودیت شانس تبیین کرد. همچنین درآمد حاصل از تحویل آب و زیان ناشی از کمبود آب نیز به صورت متغیرهای تصادفی از طریق معیار فرکتایل می‌توانند بیان شوند. علاوه بر این، تقاضای آب به دلیل وجود عدم‌حتمیت در عرضه آب نیز یک متغیر تصادفی می‌باشد، همچنین مقدار آب هدف تخصیصی وعده داده شده به صورت قطعی و معین، زمانی که جریان آب در دسترس دارای عدم‌حتمیت می‌باشد، نیز بسیار مشکل می‌باشد. علاوه‌براین، کیفیت اطلاعات ممکن است به گونه‌ای باشد که برای بیان توزیع احتمال به اندازه کافی مناسب نباشد و یا حتی در صورت دردسترس بودن توزیع آنها، منعکس کردن آن در مدل‌های بهینه‌سازی در مقیاس بزرگ می‌تواند بسیار چالش برانگیز باشد (۱۳). بنابراین چنین عدم‌حتمیت‌هایی، موجود در تابع هدف و محدودیت‌ها، می‌توانند توسط مدل برنامه‌ریزی بازه‌ای بیان شوند (۳۷). بنابراین برای بیان عدم حتمیت‌هایی که ممکن است هم در تابع هدف و هم در محدودیت‌ها وجود داشته باشد، بهتر است روش بهینه‌سازی معیار کاتاااوکا و مدل برنامه‌ریزی بازه‌ای و برنامه‌ریزی محدودیت شانس را در چهارچوب مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای ادغام کرد. مدل حاصله، مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای تعاملی بر پایه عدم حتمیت (UITSP)[2] نام‌گذاری شده است. در مرحله بعد، بر اساس نتایج مدل UITSP و با بکارگیری شاخص‌های متعدد ارزیابی ریسک و همچنین با استفاده از روش ارزیابی جامع فازی، به ارزیابی ریسک کمبود آب پرداخته می‌شود. جزئیات چارچوب مفهومی مدل توسعه‌یافته در این مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای تعاملی بر پایه عدم‌حتمیت (UITSP)

هنگامی که عدم‌قطعیت به شکل توزیع احتمال و بازه‌ای بیان می‌شوند درحالی‌که تصمیمات باید به‌طور دوره‌ای با گذشت زمان اتخاذ شوند، مسأله مطالعه می‌تواند به شکل یک ITSP فرموله شود که منعکس‌کننده یک معامله بین استراتژی‌های از پیش تعریف‌شده و تعدیلات انطباقی مرتبط با این استراتژی‌ها می‌باشد (۱۹). با درنظرگرفتن ریسک تخطی از محدودیت و عدم‌حتمیت تصادفی آب دردسترس کشاورزی در سمت راست محدودیت‌ها و عدم‌حتمیت داده‌های اقتصادی (مانند سود حاصل از مصرف آب و زیان ناشی از کمبود آن) در تابع هدف که به‌صورت توزیع احتمال بیان می‌شوند، روش CCP و معیار کاتاااوکا در مدل ITSP ادغام می‌شود که در آن سطح ریسک بالای آب دردسترس به معنای احتمال نقش بیشتر روش CCP است. بر اساس مدل اصلی ITSP (۲۱)، روش CCP (۱)، معیار کاتاااوکا (۱۵) و روش تخصیص منابع آب آبیاری کشاورزی، مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای تعاملی بر پایه عدم‌حتمیت (UITSP) برای تخصیص منابع آب آبیاری کشاورزی را می‌توان به صورت مدل (۱) تبیین کرد.

$$Max\ f^{\pm} = \sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T} NB_i^{(\pm)}(\omega)\, W_{imt}^{\pm} - \sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\sum_{h=1}^{H} \rho_{hm}\, C_i^{(\pm)}(\omega)\, S_{imth}^{\pm} \quad (\text{۱a})$$

Subject to:

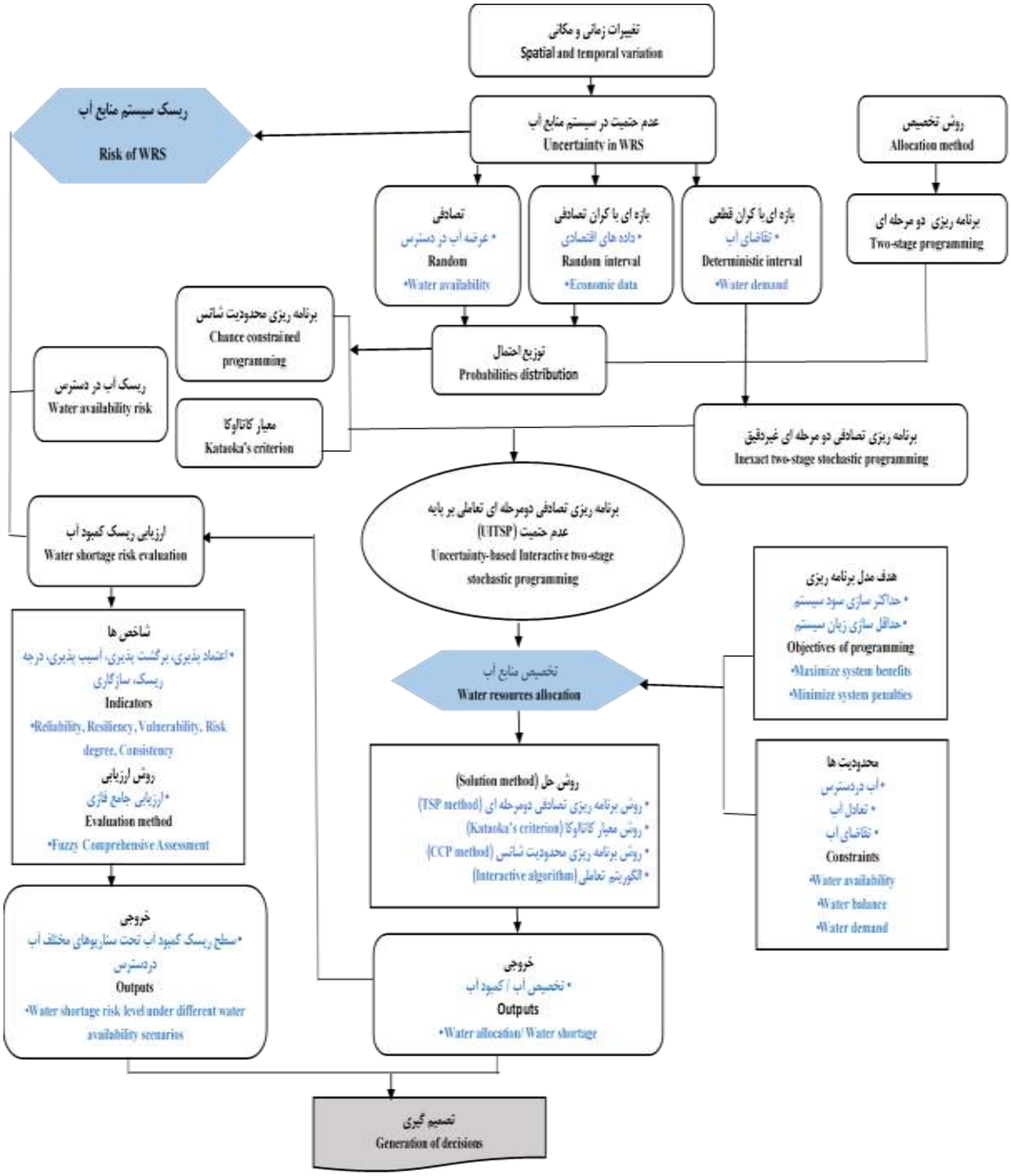
$$Pr\left\{\sum_{i=1}^{I}(W_{imt}^{\pm} - S_{imth}^{\pm})/\eta_i^{\pm} \le q_{mth}^{\pm} + \varepsilon_{m(t-1)h}^{\pm} + Q_{mt}\right\} \ge 1-\alpha, \quad \forall m,t,h \quad (\text{۱b})$$

1- Water Resources System

2- Uncertainty-based Interactive Two-stage Stochastic Programming

$$0 \leq (W_{imt}^{\pm} - S_{imth}^{\pm})/\eta_i^{\pm} \leq W_{imt,max}, \quad \forall i,m,t,h \tag{۱d}$$

$$\varepsilon_{m(t-1)h}^{\pm} = \varepsilon_{m(t-2)h}^{\pm} + (q_{m(t-1)h}^{(\alpha)})^{\pm} - \sum_{i=1}^{I}(W_{im(t-1)}^{\pm} - S_{im(t-1)h}^{\pm})/\eta_i^{\pm}, \forall m,t,h \tag{۱c}$$



شکل ۱- چارچوب مفهومی تخصیص منابع آب کشاورزی و ارزیابی ریسک تحت شرایط عدم حتمیت

Figure 1- Conceptual Framework of agricultural water resources allocation and risk evaluation under uncertainty

در روابط فوق، m بیانگر نوع منابع آبی ($m = 1$ آب سطحی و $m = 2$ آب زیرزمینی)، i بیانگر منطقه کشاورزی، h بیانگر شدت جریان آب ($h = 1$ زیاد، $h = 2$ متوسط و $h = 3$ کم)، t بیانگر دوره زمانی برنامه‌ریزی، $\pm$ بیانگر کران بالا و پایین پارامترهای بازه‌ای، f بیانگر سود خالص سیستم (ریال)، $NB_i^{\pm}(\omega)$ سود منطقه iام به ازاء هر مترمکعب آب تخصیصی (پارامتر بازه‌ای با کران تصادفی)، W_{imt} (متغیر تصمیم مرحله اول) مقدار آب هدف تخصیصی (نوع m) به فعالیت iام در زمان t، $C_i^{\pm}(\omega)$ زیان منطقه iام به ازاء هر متر مکعب آب تخصیص داده نشده (پارامتر بازه‌ای با کران تصادفی)، S_{imth} (متغیر تصمیم مرحله دوم) مقدار کمبود آب (نوع m) منطقه iام در زمان t در وضعیت h (به بیان دیگر مقداری از W_{imt} که در هنگام عرضه q_{mth} تامین نمی‌شود)، $Pr\{.\}$ بیانگر احتمال وقوع حادثه تصادفی $\{.\}$، q_{mth}مقدار آب دردسترس (نوع m) در یک سطح ریسک مجاز (α) در شدت جریان h در زمان t، ρ_{hm} احتمال وقوع سناریوی h برای منبع آب نوع m، ε_{mth} بیانگر مقدار آب مازاد (نوع m) پس از آنکه آب در زمان t در وضعیت h تخصیص داده شود، Q_{mt} مقدار آب دردسترس (نوع m) در شروع دوره t، η_i ضریب مصرف آب کشاورزی (راندمان آبیاری) در منطقه iام، $W_{imt,max}$ حداکثر مقدار تخصیص آب مجاز (نوع m) به منطقه iام در زمان t می‌باشد.

رابطه (۱a)، بیانگر تابع هدف مدل، که کسب حداکثر سود سیستم و حداقل زیان ناشی از کمبود آب با تخصیص بهینه منابع آب محدود به مناطق مختلف، می‌باشد. رابطه (۱b) محدودیت آب دردسترس را نشان می‌دهد که آب تخصیص داده شده (نوع m) به مناطق مختلف، نباید از کل آب دردسترس در هر زمان و در هر سطح جریان، بیشتر باشد. این رابطه محدودیت شانس نام دارد که $0 \leq 1 - \alpha_i \leq 1$ احتمال‌های داده‌شده برای گستره‌ای است که در آن نقض محدودیت‌ها پذیرفته می‌شود. به این معنا که محدودیت ممکن است نقض شود، اما این نقض محدودیت حداکثر (α_i) خواهد بود. به $(1 - \alpha_i)$ سطح احتمال رضایت‌بخش نیز گفته می شود. رابطه (۱c) بیانگر محدودیت تعادل آب است، به‌این‌صورت که برای یک سطح معین آب دردسترس، آب مازاد (نوع m) در یک زمان معین، برابر با مجموع آب مازاد دوره قبل و مقدار متغیر آب زمان حال می‌باشد. رابطه (۱d) نیز محدودیت تقاضای آب را بیان می‌کند که مقدار آب هدف تخصیصی (نوع m) به مناطق، نباید از حداکثر مقدار تخصیص آب مجاز (نوع m) بیشتر باشد.

بر اساس روش حل الگوریتم تعاملی (۱۲ و ۲۱) جواب‌های بهینه مدل UITSP شامل سود و میزان کمبود آب به‌صورت $f^{\pm} = [f_{opt}^{-}, f_{opt}^{+}]$، $S_{imth,opt}^{\pm} = \left[S_{imth,opt}^{-}, S_{imth,opt}^{+}\right]$ و برنامه تخصیص بهینه آب برای افق برنامه‌ریزی به‌صورت $A_{imth,opt}^{\pm} = W_{imt,opt}^{\pm} - S_{imth,opt}^{\pm}$ حاصل می‌شود.

ارزیابی ریسک کمبود آب کشاورزی

برای ارزیابی ریسک کمبود آب کشاورزی با استفاده از نتایج مدل UITSP، می‌توان از شاخص‌های ارزیابی متعددی بهره جست. از جمله شاخص‌هایی که اغلب در توصیف رفتار سیستم‌های منابع آب استفاده می‌شوند، می‌توان به شاخص‌هایی مانند اعتمادپذیری[1]، برگشت‌پذیری[2]، آسیب‌پذیری[3]، درجه ریسک[4] و سازگاری[5] اشاره کرد که در ادامه به تبیین آن‌ها پرداخته شده‌است (۹ و ۲۸).

برای یک سیستم منابع آب، اعتمادپذیری (قابلیت اطمینان) کمبود آب، به عنوان احتمال موفقیت سیستم در یک نقطه از تقاضای مفروض تعریف می‌شود که به‌صورت رابطه (۲) تبیین شده است (۲۸ و ۶).

$$\alpha = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}(1 - z_t) \tag{۲}$$

از آنجا که ریسک برعکس قابلیت اطمینان درنظر گرفته می‌شود، بنابراین، ریسک مربوطه می‌تواند به‌صورت $\beta = 1 - \alpha$ بیان شود. در روابط فوق، T افق برنامه‌ریزی، α بیانگر قابلیت اطمینان سیستم منابع آب و β بیانگر ریسک می‌باشد. z_t یک متغیر موهومی با ارزش‌های صفر و یک می‌باشد. چنانچه تقاضای آب در زمان t تامین نشود، مقدار آن برابر ۱ و در غیر این صورت، صفر در نظر گرفته می‌شود.

برگشت‌پذیری که بیان‌کننده سرعت برگشت سیستم منابع آب از حالت شکست به حالت مطلوب است به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (۹ و ۶).

$$\delta = \sum_{t=1}^{T} w_t \Big/ \sum_{t=1}^{T} z_t \tag{۳}$$

در رابطه فوق، δ بیانگر برگشت‌پذیری سیستم منابع آب، w_t متغیر موهومی با ارزش‌های صفر و یک می‌باشد. در صورتی که تقاضای آب کشاورزی در زمان t تامین نشود، اما در یک دوره بعد (t+1) تامین شود، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر به خود

1- Reliability
2- Resiliency
3- Vulnerability
4- Risk degree
5- Consistency

می‌گیرد. معکوس δ بیانگر میانگین مدت زمان توالی شکست‌های متوالی است.

رابطه (۴) آسیب‌پذیری یک سیستم منابع آب را که نشان‌دهنده شدت بزرگی شکست سیستم می‌باشد بیان می‌کند (۹).

$$\chi = \frac{1}{T_F}\sum_{t=1}^{T}\frac{z_t(D_t - A_t)}{D_t} \quad (۴)$$

در این رابطه، χ بیانگر آسیب‌پذیری سیستم منابع آب، T_F بیانگر کل دوره‌های زمانی شکست، D_t و A_t به ترتیب بیانگر تقاضای آب کشاورزی و تخصیص آب در زمان t می‌باشند.

درجه ریسک ویژگی تصادفی بودن سیستم را که ناشی از عدم‌حتمیت است، بیان می‌کند که با رابطه (۵) بیان می‌شود.

$$C_v = \sigma/\mu \quad (۵)$$

در رابطه فوق، C_v بیانگر درجه ریسک می‌باشد که ضریب تغییرات[1] نیز نامیده می‌شود. σ انحراف معیار نمونه و μ میانگین نمونه می‌باشند (۲۸).

شاخص سازگاری به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری ارتباطات پویا بین عرضه و تقاضای آب در یک دوره زمانی ارائه شده است. مقدار این شاخص بین صفر و یک متغیر است و مقادیر بالای شاخص، بیانگر سازگاری بیشتر سیستم می‌باشد که به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود (۶).

$$\lambda = \frac{\sum_{t=1}^{T}(\Delta_{max} - \Delta_{(t)})}{T(\Delta_{max} - \Delta_{min})} \quad (۶)$$

در رابطه فوق λ بیانگر سازگاری سیستم منابع آب، $\Delta_{(t)} = |A_t^* - D_t^*|$ و $A_t^* = \frac{T.A_t}{\sum_{t=1}^{T} A_t}$ و $D_t^* = \frac{T.D_t}{\sum_{t=1}^{T} D_t}$ و $\Delta_{max} = max\{\Delta_{(1)}, \Delta_{(2)}, \dots, \Delta_{(T)}\}$ و $\Delta_{min} = min\{\Delta_{(1)}, \Delta_{(2)}, \dots, \Delta_{(T)}\}$ می‌باشند.

روش ارزیابی

با توجه به اینکه شاخص‌های ارزیابی به تنهایی در صورت پیچیده‌بودن منابع احتمالی عدم حتمیت، اطلاعات کافی را ارائه نمی‌دهند، بنابراین نمی‌توانند به طور دقیق ریسک (عملکرد سیستم) را ارزیابی کنند؛ لذا یک ترکیب مناسب که به طور کامل منعکس کننده ریسک WRS باشد، بایستی برای ارزیابی جامع انتخاب شود. از میان روش‌های ارزیابی ریسک، روش ارزیابی جامع فازی (FCA)[2] که به عنوان یک راه‌حل موثر در حل مسائل فازی و کنترل اثر شاخص‌های متعدد بر روی نتایج ارزیابی شناخته شده است در این مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرد (۸، ۲۰ و ۲۶).

با تعیین ماتریس شاخص ارزیابی U به صورت $U = (u_i)$ که u_i ها مقدار هر یک از شاخص‌های مورد مطالعه می‌باشند و ایجاد کلاس ارزیابی $V = (v_j)$ که v_j درجه‌های مختلف سیستم شاخص (به عنوان مثال بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد) می‌باشد، ماتریس تابع عضویت فازی به صورت رابطه (۷) تشکیل می‌شود.

$$R = (\mu_{vj}(u_i))_{J\times n} = \begin{bmatrix} (\mu_{vj}(u_i))_{11} & (\mu_{vj}(u_i))_{12} & \cdots & (\mu_{vj}(u_i)) \\ (\mu_{vj}(u_i))_{21} & (\mu_{vj}(u_i))_{22} & & (\mu_{vj}(u_i)) \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ (\mu_{vj}(u_i))_{J1} & (\mu_{vj}(u_i))_{J2} & \cdots & (\mu_{vj}(u_i)) \end{bmatrix} \quad (۷)$$

در رابطه فوق، R ماتریس تابع عضویت، n تعداد شاخص‌های ارزیابی، J تعداد کلاس ارزیابی و $(\mu_{vj}(u_i))_{jn}$ میزان درجه عضویت شاخص i در کلاس j می‌باشد. بنابراین مجموعه جامع ضرایب ارزیابی B از حاصل‌ضرب ماتریس ضرایب وزنی (W) در ماتریس تابع عضویت فازی (R) به صورت رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$B = W \times R = (b_1, b_2, \dots, b_j)_{1\times J} \quad (۸)$$

تعیین وزن شاخص‌های ارزیابی (W) که بیانگر اهمیت هر شاخص ارزیابی می‌باشد، یکی از بخش‌های مهم و از جمله دشواری‌های رایج در ارزیابی جامع فازی است، زیرا انتخاب وزن شاخص، تأثیر عمیقی بر نتایج ارزیابی دارد. در گذشته، جهت تعیین وزن شاخص‌های ارزیابی، معمولاً از روش‌های تعیین ذهنی وزن مانند فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)[3] استفاده می‌شد. این روش ارزیابی به دلیل تاثیر عوامل ذهنی انسانی ممکن است نتایج مغرضانه و نادرستی ارائه دهد. برای رفع این مشکل، از روش تحلیل مؤلفه‌های اساسی (PCA)[4] بهره گرفته می‌شود که باعث می‌شود تعیین وزن دارای یک مبنای نظری خاص باشد. به‌طور معمول PCA شامل شش مرحله مهم (برای ارزش‌گذاری وزن) می‌باشد (۲۸) که عبارتند از ۱) استاندارد کردن شاخص‌ها برای اطمینان از اینکه همه آن‌ها دارای وزن یکسان در تحلیل باشند. ۲) محاسبه ماتریس کوواریانس. ۳) محاسبه مقادیر ویژه (λ_1، λ_2، ...، λ_p) و بردار مقادیر ویژه مربوطه (a_1، a_2، ...، a_p). ۴) حذف هر گونه اجزائی که صرفا بخش کوچکی از تغییرات در مجموعه داده‌ها را تشکیل می‌دهند. ۵) محاسبه ضریب مربوط به هر شاخص با توجه به مؤلفه‌های اصلی انتخاب شده. ۶) در نهایت ارزش وزنی هر شاخص توسط نرمال‌سازی ضریب مربوطه به‌دست می‌آید.

نتیجه خروجی حاصل از رابطه (۸)، شامل J عدد است (به دلیل وجود J کلاس کیفی ریسک) که هر یک مبین میزان درجه عضویت شاخص i ام به کلاس‌های مختلف است. ولی برای غیرفازی‌سازی و قابل استفاده بودن در تصمیم‌گیری‌ها و امور مدیریتی، لازم است این نتیجه به‌صورت یک کلاس واحد بیان شود. یکی از روش‌های بسیار

1- Variation Coefficient

2- Fuzzy Comprehensive Assessment

3- Analytic Hierarchy Process

4 - Principle Component Analysis

مرسوم، استفاده از روش حداکثر عضویت[1] است که به‌طور گسترده در تصمیم‌گیری‌ها و ارزیابی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، این اصل نمی‌تواند ابهامات موجود در مرز هدف را منعکس کند و این امر منجر به از دست رفتن اطلاعات و انحراف در نتایج می‌شود. برای رفع این نقص، اصل متوسط وزنی[2] جایگزین اصل حداکثر درجه عضویت قرار داده شده است. بر اساس اصل متوسط وزنی، کلاس‌های $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_5)$ مانند Z=(1, 2, …, 5) به ضرایب ارزیابی داده می‌شود. بر این اساس، مقدار ویژه کلاس هدف با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود (۳۵).

$$A_p = \frac{\sum_{j=1}^{J} b_j^2 z_j}{\sum_{j=1}^{J} b_j^2} \qquad (۹)$$

در رابطه فوق، A_p مقدار ویژه کلاس هدف می‌باشد. در این مطالعه مقادیر $z_1 = 0.05$، $z_2 = 0.25$، $z_3 = 0.5$، $z_4 = 0.75$ و $z_5 = 0.95$ بر اساس درجه ریسک (بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد) به ترتیب به ضرایب ارزیابی اختصاص داده می‌شود.

نتایج و بحث

در این قسمت ابتدا نتایج حاصل از حل مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای بر پایه عدم‌حتمیت (UITSP) برای تخصیص منابع آب محدوده مطالعاتی مرند برای سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ ارائه شده و سپس به ارزیابی ریسک کمبود آب در این محدوده پرداخته شده است. آمار و اطلاعاتی که برای مطالعه حاضر و برآورد الگوها لازم می‌باشد، بخشی مربوط به اطلاعات قیمت، تولید و سطح زیرکشت محصولات عمده در محدوده مطالعاتی مرند می‌باشد که از سازمان جهاد کشاورزی و موسسات تابعه و آمارنامه‌های مربوطه برای دوره زمانی ۱۳۹۸-۱۳۸۴ تهیه شده‌اند. بخش دیگر آمار مربوط به اطلاعات آب و هوایی و هیدرولوژیکی محدوده می‌باشد که از طریق سازمان هواشناسی و آب منطقه‌ای استان آذربایجان‌شرقی برای دوره زمانی ۱۳۹۸-۱۳۷۳ گردآوری شده‌اند.

تخصیص منابع آب محدوده مطالعاتی مرند بر اساس نتایج مدل UITSP

کل مصرف آب‌های سطحی و زیرزمینی در محدوده مطالعاتی مرند ۲۴۹/۸۳ میلیون متر مکعب است که از این مقدار ۲۱۳/۳۹ میلیون متر مکعب در بخش کشاورزی، ۲/۷۵ میلیون متر مکعب در بخش صنعت و ۳۳/۶۹ میلیون متر مکعب در بخش شرب به مصرف می‌رسد. از کل حجم آب مصرفی ۲۰۳/۵ میلیون متر مکعب (۸۱/۵ درصد) متعلق به منابع آب زیرزمینی (چاه و قنات) با مصارف گوناگون و ۴۶/۳۳ میلیون متر مکعب (۱۸/۵ درصد) از آب‌های سطحی برداشت می‌شود که به مصرف کشاورزی و شرب می‌رسد (۳۳). مطابق با شرایط محلی، محدوده مطالعاتی به سه سایت تقاضا شامل مرند، بناب مرند و زنوز تقسیم شده است.

در پروسه حل مدل توسعه داده شده در این مطالعه برای تبیین ریسک مربوط به عدم‌حتمیت موجود در تابع هدف، مقادیر مختلف برای معیار فرکتایل (β) در بازه (۱، ۰) و برای تبیین ریسک محدودیت آب دردسترس، سه سطح احتمال تخطی از محدودیت (۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱) برای α در نظر گرفته شده‌است. همچنین در این مدل، برای متغیرهای بازه‌ای که دارای کران بالا و پایین می‌باشند، مقادیر وضعیت موجود راندمان آبیاری و مقادیر با افزایش راندمان آبیاری (۱۰ درصد) برای کران‌های بالا و پایین در نظر گرفته شده است.

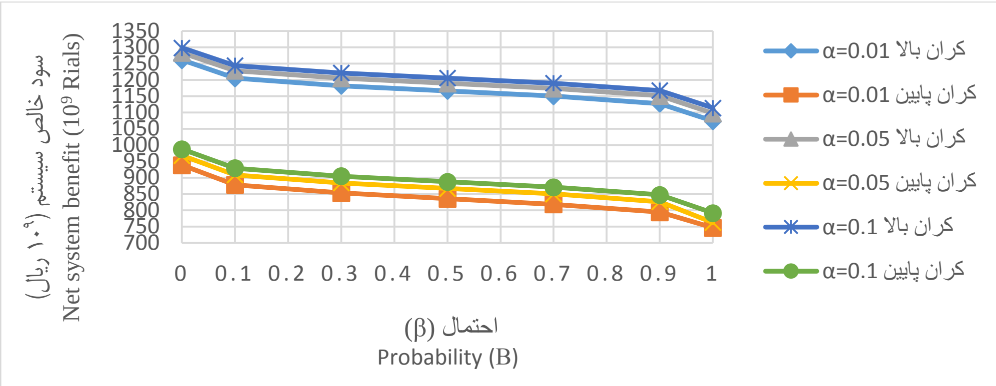
در شکل ۲ سود خالص سیستم، یعنی تفاوت بین سود حاصل از تخصیص بهینه آب و زیان ناشی از کمبود آب، تحت ترکیبات مختلف احتمال تخطی از محدودیت (α) و سطوح مختلف معیار فرکتایل (β) نشان داده شده است. شکل ۲ نشان می‌دهد که مینیمم سود خالص سیستم، زمانی‌که $\alpha = 0.01$ و $\beta = 0.9$ باشند [۷۴۶/۰۲، ۱۰۷۳/۸] میلیارد ریال و ماکزیمم آن زمانی‌که $\alpha = 0.1$ و $\beta = 0.01$ باشند [۹۸۷/۶ ، ۱۲۹۸/۳] میلیارد ریال می‌باشد. همچنین به ازاء هر احتمال تخطی از محدودیت (α)، با افزایش سطح رضایت تابع هدف (β)، هر دو کران بالا و پایین سود خالص سیستم به تدریج کاهش می‌یابد. این بدان مفهوم است که سود خالص سیستم به سطح رضایت تابع هدف غیرحساس است. با این‌حال در ادامه مطالعه مقدار $\beta = 0.9$ به عنوان سطح رضایت تابع هدف انتخاب شده است. از طرف دیگر، اختلاف بین سود خالص سیستم تحت سطوح مختلف تخطی از محدودیت (α) قابل توجه است. این وضعیت بیانگر این است که سود خالص سیستم به سطح احتمال تخطی از محدودیت (α) حساس است.

متوسط کمبود آب آبیاری کشاورزی مناطق مختلف محدوده مطالعاتی مرند و سود خالص سیستم تحت سطوح مختلف شدت جریان آب و سطوح مختلف تخطی از محدودیت (بر اساس مدل UITSP) در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۳ نشان می‌دهد که با احتمال تخطی بالاتر، آب بیشتری می‌تواند به مناطق مختلف آبیاری تخصیص داده شود که این منجر به سود بیشتر سیستم و کاهش سطح کمبود آب می‌شود. اما اگرچه سود خالص سیستم تحت سطوح مختلف احتمال تخطی از محدودیت، افزایش می‌یابد، لکن میزان افزایش سود متغیر است. با در نظر گرفتن $\alpha = 0$ به عنوان معیار مقایسه، میزان افزایش سود برای سطوح احتمال $\alpha = 0.01$، $\alpha = 0.05$ و $\alpha = 0.1$ محاسبه شده که به ترتیب برابر با ۲۲/۹، ۲۶/۱ و ۱۸/۸ میلیارد ریال است که بیانگر یک روند افزایشی در ابتدا و سپس یک روند کاهشی می‌باشد که مطابق با نتایج مطالعات چانگ

1- Maximum membership

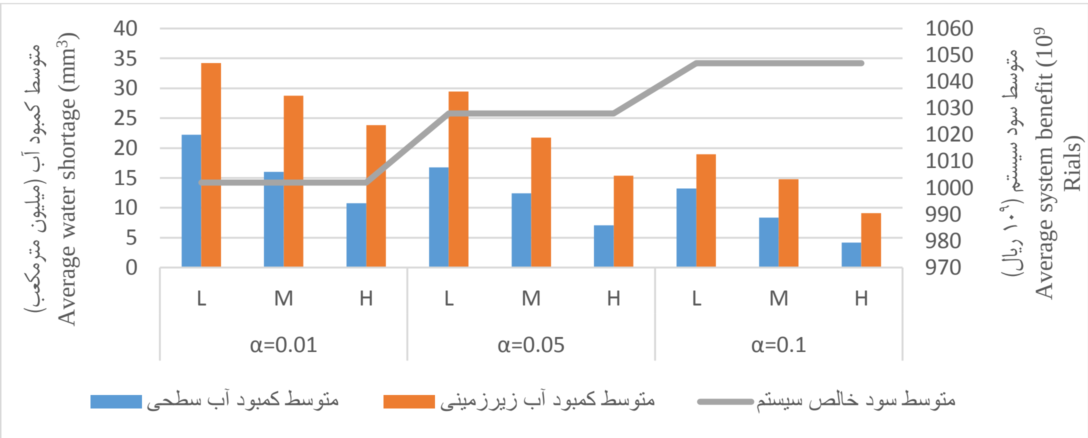
2- Weighted average principle

و همکاران (۴)، بوهل و همکاران (۲)، صبوحی و مردانی (۲۹) و مردانی و همکاران (۲۳ و ۲۴) می‌باشد. بر این اساس، سطح احتمال مطلوب تخطی از محدودیت، تصمیم‌گیرندگان و مدیران را برای مدیریت آب کشاورزی به چالش کشیده است. با توجه به نتایج $\alpha = 0.05$ به عنوان یک احتمال تخطی مطلوب برای تصمیم‌گیرندگان، از نظر این مطالعه موردی، در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲- سود خالص سیستم محدوده مطالعاتی مرند تحت ترکیبات مختلف احتمال α و β

Figure 2- Net system benefits of Marand Basin under different combinations of probabilities α and β



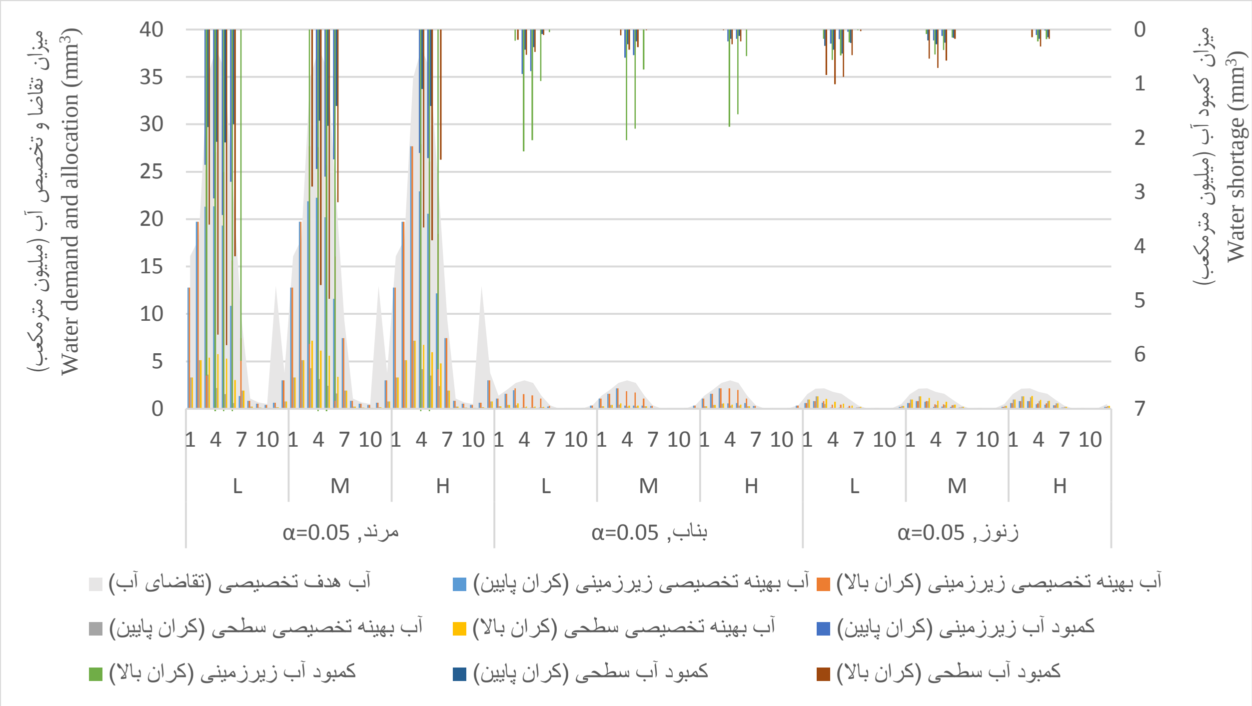
شکل ۳- متوسط کمبود آب آبیاری کشاورزی محدوده مطالعاتی مرند و سود خالص سیستم تحت سناریوهای مختلف

Figure 3- Average total agricultural irrigation shortage of Marand basin and system benefit under various scenarios

بر اساس تجزیه و تحلیل فوق و با در نظر گرفتن $\alpha = 0.05$ به عنوان احتمال مطلوب تخطی از محدودیت، میزان تقاضا، تخصیص و کمبود ماهانه آب کشاورزی (سطحی و زیرزمینی) برای مناطق مختلف آبیاری محدوده مطالعاتی مرند (شامل مرند، بناب و زنوز) تحت سناریوهای مختلف شدت جریان آب به‌دست آمده است که در شکل ۴ نشان داده شده است.

نتایج حاصل از حل مدل UITSP نشان می‌دهد که فصل خشک یعنی ماه‌های تیر، مرداد و شهریور دوره‌های اوج تخصیص و تقاضای آب در محدوده مطالعاتی مرند می‌باشند، که در این ماه‌ها علیرغم نیاز آبی فراوان، میزان تخصیص آب در وضعیت فعلی کمتر از میزان تقاضا است که منجر به کمبود آب بیشتر در این ماه‌ها می‌شود؛ لکن نتایج نشان می‌دهد که با افزایش راندمان آبیاری و تخصیص آب با استفاده از مدل توسعه داده شده، میزان تخصیص و تقاضای آب کشاورزی تقریباً متعادل شده و علاوه بر کاهش کمبود آب، منجر به کنترل برداشت و جلوگیری از اضافه برداشت از چاه‌ها می‌گردد و همچنین اهداف سازمان آب منطقه‌ای که همانا کاهش میزان آب تخصیصی در بخش کشاورزی می‌باشد، تحقق می‌یابد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد میزان تخصیص سالانه منابع آب سطحی در کل محدوده مطالعاتی مرند از [۳۹/۱، ۲۵/۳] میلیون متر مکعب تحت سناریوی شدت جریان کم و [۴۲/۷، ۳۰/۳] میلیون متر مکعب تحت سناریوی شدت جریان متوسط تا [۴۵/۸، ۳۷/۸] میلیون متر مکعب تحت سناریوی شدت جریان بالا تغییر می‌کند. میزان تخصیص سالانه منابع آب زیرزمینی نیز از [۱۵۱/۷، ۱۲۰/۷] میلیون متر مکعب تحت سناریوی شدت جریان کم و [۱۵۶/۷، ۱۳۱/۲] میلیون متر مکعب تحت سناریوی شدت جریان متوسط تا [۱۶۰/۵، ۱۴۰/۱] میلیون متر مکعب تحت سناریوی شدت جریان بالا تغییر می‌کند.



شکل ۴- میزان تقاضا، تخصیص و کمبود ماهانه آب کشاورزی مناطق مختلف آبیاری تحت سطوح مختلف شدت جریان آب و سطح احتمال $\alpha = 0.05$

Figure 4- Monthly agricultural water demand, allocation and shortage conditions of different irrigation areas under different flow levels when $\alpha = 0.05$

در جدول ۱ شرایط واقعی با نتایج حاصل از مدل توسعه داده شده (UITSP) مقایسه شده است. بر اساس جدول ۱ مشاهده می‌شود که با توجه به محدودیت آب دردسترس و با فرض ثابت بودن مقدار مصرف آب در سایر بخش‌ها، مقدار بهینه آب زیرزمینی تخصیص داده شده در محدوده مطالعاتی مرند بر اساس مدل توسعه‌یافته، به‌طور متوسط برابر با ۱۵۶/۱ میلیون متر مکعب در سال است که نسبت به وضع موجود، ۷/۸ میلیون متر مکعب کاهش یافته است. بیلان منفی آبخوان نیز به ۷/۶ میلیون متر مکعب تنزل کرده است، یعنی در این حالت حجم آب آبخوان حدود ۵۰/۴ درصد نسبت به وضع موجود بهبود پیدا کرده است. سود خالص سیستم نیز با افزایش ۱۷/۶ درصدی مواجه شده است. نتایج حاکی از آن است که تخصیص منابع آب با استفاده از مدل توسعه داده شده، موجب کاهش کمبود آب و تخصیص بیشتر و در عین حال کاراتر منابع آب در محدوده مطالعاتی شده و همچنین سود خالص سیستم را نیز افزایش می‌دهد.

جدول ۱- مقایسه نتایج حاصل از مدل UITSP با وضعیت فعلی محدوده مطالعاتی مرند

Table 1- Comparison actual conditions of Maran basin with the results of UITSP

	وضع موجود (واقعی) Actual condition	وضع بهینه Optimal condition
مصرف سالانه آب زیرزمینی در بخش کشاورزی (میلیون متر مکعب) Annually agricultural irrigation water use (mm^3)	163.9	156.1
تغییرات سالانه حجم آبخوان Annual change in aquifer volume	-15.4	-7.6
درصد تغییر حجم آبخوان نسبت به وضع موجود Percentage change of aquifer volume compared to the actual condition	-	+50.4
سود خالص سیستم (۱۰^۱۰×ریال) Net system benefit (10^{10} Rials)	105.5	128.1
درصد تغییر سود خالص سیستم نسبت به وضع موجود Percentage change in the net system benefit compared to the actual condition	-	+17.6

ارزیابی ریسک کمبود آب کشاورزی

در این بخش از مطالعه، به ارزیابی ریسک کمبود آب تحت سطوح مختلف ریسک دردسترس بودن آب کشاورزی و سطوح مختلف شدت جریان آب در محدوده مطالعاتی مرند، به منظور توسعه بینش و آگاهی در مورد شرایط کمبود آب محدوده و در نتیجه ترویج اقدامات مناسب صرفه جویی در آب، پرداخته می‌شود. بر اساس طبقه‌بندی شاخص‌های ارزیابی (۲۸) که در جدول ۲ بیان شده است، مقدار شاخص‌های ارزیابی ریسک کمبود آب کشاورزی برای محدوده مطالعاتی مرند تحت سطوح مختلف شدت جریان آب و سطوح مختلف تخطی از محدودیت، برای کران پایین و بالا محاسبه شده و در جدول ۳ آورده شده است. براساس طبقه‌بندی که در جدول ۲ ارائه شده است، سطح ریسک کمتر کمبود آب کشاورزی بدان معنی است که سیستم تحمل بهتری نسبت به ریسک کمبود آب دارد. بر این اساس، ریسک بسیارکم قابل اغماض است، ریسک کم قابل قبول است، ریسک متوسط حاشیه‌ای است، ریسک بالا جدی و بحرانی است و ریسک بسیاربالا غیر قابل تحمل است.

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص‌های ارزیابی

Table 2- Evaluation index factor classification

ریسک کمبود آب Water shortage risk	ریسک Risk	آسیب‌پذیری Vulnerability	برگشت‌پذیری Resiliency	سازگاری Consistency	درجه ریسک Risk degree
سطح ریسک بسیارکم (I) Very Low risk level (I)	≤0.200	≤0.200	≥0.800	≥0.800	≤0.200
سطح ریسک کم (II) Low risk level (II)	0.201-0.400	0.201-0.400	0.601-0.800	0.601-0.800	0.201-0.800
سطح ریسک متوسط (III) Middle risk level (III)	0.401-0.600	0.401-0.600	0.401-0.600	0.401-0.600	0.801-1.400
سطح ریسک زیاد (IV) High risk level (IV)	0.601-0.800	0.601-0.800	0.201-0.400	0.201-0.400	1.401-2.00
سطح ریسک بسیارزیاد (V) Very High risk level (V)	≥0.800	≥0.800	≤0.200	≤0.200	≥2.00

شاخص‌های اعتمادپذیری و ریسک به ترتیب احتمال رضایت و عدم رضایت را در یک سیستم نشان می‌دهند. جدول ۳ نشان می‌دهد که در محدوده مطالعاتی مرند در وضعیت فعلی (کران پایین)، شاخص ریسک از ۷۵ درصد در بدترین سناریو (شدت جریان کم و تخطی از محدودیت ۰/۰۱) به مقدار ۵۶ درصد در بهترین سناریو (شدت جریان بالا و تخطی از محدودیت ۰/۱) کاهش پیدا کرده است. این بدان معنی است که با افزایش مقدار جریان آب و همچنین افزایش تخطی از محدودیت که منجر به تخصیص میزان آب بیشتر و در نتیجه کمبود آب کمتری می‌گردد، ریسک کمبود آب از ۷۵ درصد به ۵۶ درصد کاهش می‌یابد که در طبقه‌بندی شاخص‌های ارزیابی، از محدوده ریسک زیاد (سطح IV) به محدوده ریسک متوسط (سطح III) منتقل می‌شود. اعتمادپذیری نقطه مقابل ریسک می‌باشد، به بیان دیگر مقادیر بالای این شاخص با مقادیر کمتر ریسک متناسب است. بنابراین روند اعتمادپذیری برعکس ریسک می‌باشد. شاخص آسیب‌پذیری تحت سطوح مختلف شدت جریان و همچنین سطوح مختلف تخطی از محدودیت در هر دو کران بالا و پایین، به طور قابل توجهی تغییر کرده است. به‌طوری‌که در کران پایین از ۷۲ درصد در بدترین سناریو به ۳۹ درصد در بهترین سناریو کاهش پیدا کرده است، به بیان دیگر احتمال افزایش کمبود آب طی دوره، در شرایط فعلی، از ۷۲ درصد به ۳۹ درصد می‌تواند کاهش پیدا کند. در کران بالا نیز مقدار این شاخص از ۰/۳۴ در بدترین سناریو (محدوده ریسک کم) به ۰/۰۶ در بهترین سناریو (محدوده ریسک بسیارکم) کاهش یافته است. مقادیر نشان می‌دهند که در کران بالا، احتمال افزایش کمبود آب بسیار کاهش پیدا می‌کند. شاخص‌های سازگاری و برگشت‌پذیری دارای روند معکوس شاخص‌های قبل می‌باشند؛ به‌طوری‌که شاخص سازگاری در کران پایین، از ۳۵ درصد در بدترین سناریو به ۴۰ درصد در بهترین سناریو افزایش پیدا کرده است. در کران بالا نیز، مقدار شاخص سازگاری از ۰/۳۶ در بدترین سناریو به ۰/۵۱ در بهترین سناریو افزایش یافته است. یافته‌ها حاکی از آن است که روند تغییرات عرضه و تقاضای آب حتی در کران بالا نیز با یکدیگر اختلاف دارند. شاخص برگشت‌پذیری نیز در کران پایین، از ۲۰ درصد در بدترین سناریو به ۳۹ درصد در بهترین سناریو افزایش پیدا کرده است که بیانگر این است که سرعت برگشت سیستم از حالت شکست به حالت مطلوب در وضعیت فعلی، با افزایش شدت جریان آب (با سرعت کمی) افزایش می‌یابد و در محدوده ریسک بالا قرار دارد. در حالی‌که مقدار این شاخص در کران بالا از ۲۳ درصد در بدترین سناریو به ۸۳ درصد

در بهترین سناریو افزایش یافته است که بیانگر بهبود سرعت برگشت سیستم به حالت مطلوب می‌باشد. به بیان دیگر براساس این شاخص، سیستم در کران بالا در محدوده ریسک کم قرار می‌گیرد. شاخص درجه ریسک در وضعیت فعلی (کران پایین) از ۲/۶ در بدترین سناریو به ۱/۶۳ در بهترین سناریو کاهش یافته است (از سطح ریسک بسیار بالا به سطح ریسک متوسط رسیده است). مقدار این شاخص در کران بالا نیز از ۲/۲۱ در بدترین سناریو به ۱/۴۷ در بهترین سناریو کاهش یافته است که در محدوده‌های ریسک بالا و متوسط قرار دارد.

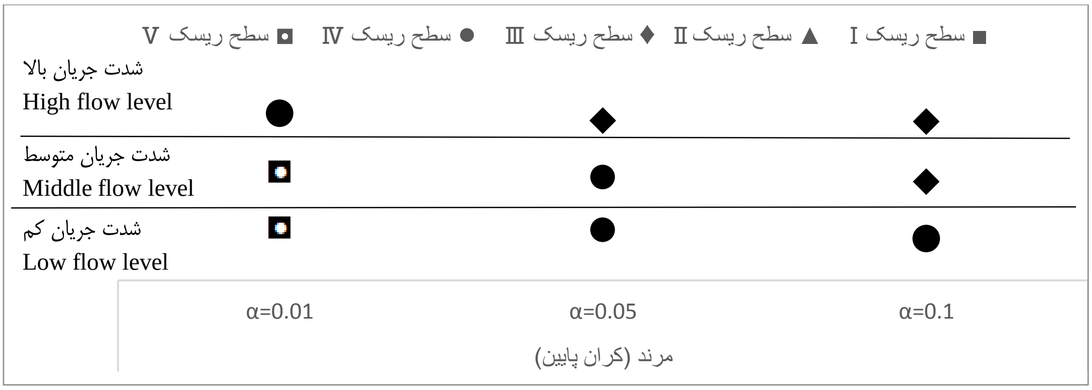
جدول ۳- مقدار شاخص‌های ارزیابی ریسک کمبود آب محدوده مطالعاتی مرند
Table 3- Results of water shortage risk evaluation index of Marand basin

کران پایین Lower bound									
سطح احتمال تخطی Probability of violating constraint		**0.01**			**0.05**			**0.1**	
شدت جریان آب Flow level	کم Low	متوسط Middle	بالا High	کم Low	متوسط Middle	بالا High	کم Low	متوسط Middle	بالا High
اعتمادپذیری (α) Reliability (α)	0.25	0.25	0.31	0.28	0.31	0.39	0.33	0.39	0.44
ریسک (β) Risk (β)	0.75	0.75	0.69	0.72	0.69	0.61	0.67	0.61	0.56
آسیب‌پذیری (χ) Vulnerability (χ)	0.72	0.51	0.42	0.58	0.43	0.32	0.49	0.43	0.39
سازگاری (λ) Consistency (λ)	0.35	0.35	0.38	0.36	0.39	0.36	0.34	0.34	0.40
برگشت‌پذیری (δ) Resiliency (δ)	0.20	0.20	0.32	0.22	0.23	0.31	0.25	0.31	0.39
درجه ریسک (CV) Risk degree (CV)	2.6	2.37	2.04	2.38	1.94	1.78	2.17	1.78	1.63
کران بالا Upper bound									
سطح احتمال تخطی **Probability of violating constrain**		0.01			0.05			0.1	
شدت جریان آب Flow level	کم Low	متوسط Middle	بالا High	کم Low	متوسط Middle	بالا High	کم Low	متوسط Middle	بالا High
اعتمادپذیری (α) Reliability (α)	0.31	0.33	0.47	0.36	0.42	0.50	0.42	0.50	0.56
ریسک (β) Risk (β)	0.69	0.67	0.53	0.64	0.58	0.50	0.58	0.50	0.44
آسیب‌پذیری (χ) Vulnerability (χ)	0.34	0.21	0.16	0.25	0.19	0.11	0.15	0.1	0.06
سازگاری (λ) Consistency (λ)	0.36	0.36	0.35	0.36	0.42	0.42	0.37	0.42	0.51
برگشت‌پذیری (δ) Resiliency (δ)	0.23	0.25	0.44	0.28	0.36	0.5	0.36	0.5	0.83
درجه ریسک (CV) Risk degree (CV)	2.21	1.95	1.74	1.98	1.66	1.6	1.69	1.55	1.47

در ادامه بر اساس پروسه ارزیابی جامع فازی، ماتریس تابع عضویت فازی برای محدوده مطالعاتی مرند تحت سطوح مختلف شدت جریان آب و سطوح مختلف تخطی از محدودیت (سناریوهای ۱ تا ۹) برای کران پایین و بالا محاسبه شده و در جدول ۱ پیوست آورده شده است. نتایج نهایی مقادیر ارزیابی جامع ریسک کمبود آب در محدوده مطالعاتی مرند، برای کران پایین و کران بالا، تحت سطوح

مختلف شـــدت جریان آب و ســـطوح مختلف تخطی از محدودیت در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

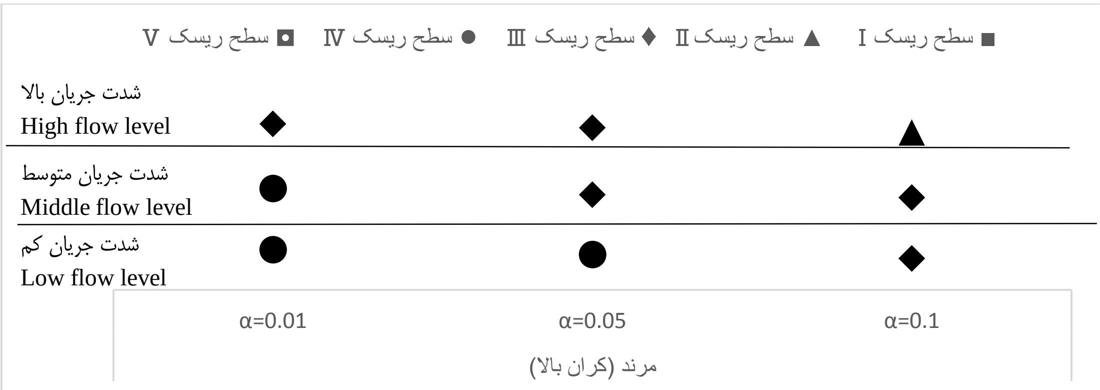
شـکل ۵ سطح ریسک کمبود آب در محدوده مطالعاتی مرند را در کران پایین نشـــان می‌دهد. نمودار فوق بیان می‌کند با توجه به میزان تقاضـای ماهانه کشـاورزی و پس از تخصیص بهینه منابع آب، سطح ریسک کمبود آب کشاورزی در محدوده مطالعاتی مرند در کران پایین (وضـعیت فعلی)، در سطح تخطی محدودیت ۰/۰۱ و شدت جریان کم و متوسـط، بسـیارزیاد (سـطح V) می‌باشـد، سـپس با افزایش شدت جریـان آب و همچنین افزایش میزان تخطی از محـدودیـت، میزان ریسک به سطح زیاد (IV) رسیده که بیانگر سطح ریسک جدی است و مجددا با افزایش شـدت جریان آب، از میزان ریسـک کم شده و به سـطح متوسـط (سـطح III) می‌رسد که در رده ریسک حاشیه‌ای قرار دارد. با سـطح تخطی ۰/۱ و شـدت جریان کم آب، مجددا ریسـک به سـطح زیاد می‌رسـد و پس از آن با افزایش میزان دسـترسـی به آب (شـدت جریان متوسـط و بالا) میزان ریسـک کاهش یافته و به سطح متوسط تنزل می‌یابد.



شکل ۵- سطح ریسک کمبود آب در محدوده مطالعاتی مرند تحت سناریوهای مختلف (کران پایین)

Figure 5- Water shortage risk evaluation results of Marand Basin under different scenarios (lower bound)

سـطح ریسـک کمبود آب محدوده مطالعاتی مرند در کران بالا در شـکل ۶ نشـان داده شـده اسـت. نتایج نشـان می‌دهد که در صورت تخصیص منابع آب با استفاده از نتایج کران بالای مدل توسعه‌یافته در محدوده مطالعاتی مرند، میزان ریســـک کمبود آب در ســـطح تخطی محدودیت ۰/۰۱ و شدت جریان کم و متوسط، در سطح زیاد (IV) قرار می‌گیرد که بیانگر سطح بحرانی و جدی می‌باشد، پس از آن با افزایش میزان دسترسی به آب، سطح ریسک کمبود آب به سطح متوسط (III) که بیانگر سـطح ریسـک حاشـیه‌ای اسـت کاهش می‌یابد. در سـطح تخطی ۰/۰۵ و شـــدت جریان کم، مجددا ســـطح ریســـک کمبود آب افزایش یافته و به سـطح زیاد (جدی) می‌رسد، سپس با افزایش شدت جریان آب از میزان ریسک کم می‌شود. در سطح تخطی ۰/۱ و شدت جریان کم و متوسـط، با افزایش میزان دسـترسـی به آب، با سـطح ریســک متوســط (حاشـیه‌ای) مواجه می‌شـود و در نهایت در بهترین سناریو، میزان ریسک کمبود آب به سطح کم (قابل قبول) می‌رسد.



شکل ۶- سطح ریسک کمبود آب در محدوده مطالعاتی مرند تحت سناریوهای مختلف (کران بالا)

Figure 6- Water shortage risk evaluation results of Marand Basin under different scenarios (upper bound)

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه یک چارچوب مبتنی بر عدم‌حتمیت برای تخصیص منابع آب کشاورزی و ارزیابی ریسک کمبود آب توسعه داده شده است. چهارچوب توسعه‌یافته به‌طورکامل عدم‌قطعیت‌های موجود در سیستم منابع آب را به صورت توابع توزیع احتمال و بازه‌ای، هم در تابع هدف و هم در محدودیت‌ها، در نظرگرفته و همچنین این عدم‌قطعیت‌ها را با کران‌های تصادفی در نظر می‌گیرد. لذا انواع گزینه‌های تصمیم‌گیری را برای تجزیه و تحلیل مصالحه بین منافع سیستم و ریسک‌های مربوطه فراهم می‌کند. از سوی دیگر یکی دیگر از مزایای مدل پیشنهادی این است که پیش از آن که عدم‌قطعیت‌های مربوط به پارامترهای مدل (به خصوص میزان آب در دسترس از منابع) مشخص شوند، هدف‌گذاری برای بخش‌های مختلف انجام می‌شود و سپس مدل بهینه‌سازی حل می‌شود و پس از آن‌که عدم‌قطعیت‌ها مشخص شدند به هر مصرف‌کننده اطلاع‌رسانی می‌شود که چه مقدار آب دریافت می‌کند و در واقع چقدر با کمبود روبرو می‌شود. بنابراین مصرف‌کننده کشاورزی می‌داند که چقدر در آینده آب دریافت می‌کند تا سرمایه‌گذاری مناسبی بر روی زمین‌های خود داشته باشد و در صورت مواجهه با کمبود، یا آب را از منابع دیگر تهیّه کند یا کشت و زرع خود را محدود کند. با کاربرد چارچوب توسعه‌یافته در محدوده مطالعاتی مرند، مجموعه‌ای از نتایج تخصیص منابع آب کشاورزی به صورت بازه‌ای و سطح ارزیابی ریسک کمبود آب کشاورزی تحت سطوح مختلف شدت جریان و تخطی از محدودیت ایجاد می‌شود. مقایسه نتایج بهینه تخصیص و شرایط واقعی (موجود) مصرف آب کشاورزی، قابلیت کاربرد چارچوب توسعه‌یافته را نشان می‌دهد.

در مجموع نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که وضع موجود بهره‌برداری در محدوده مطالعاتی مرند در شرایط نامناسبی قرار دارد و در صورت ثابت ماندن روش‌های مدیریتی منجر به افزایش بیش از حد بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی خواهدشد که این امر افزایش بیلان منفی آبخوان را به دنبال خواهدداشت. همچنین نتایج ارزیابی ریسک کمبود آب نشان می‌دهد در شرایط فعلی با توجه به طبقه‌بندی شاخص‌های ریسک، سطح ریسک در محدوده مطالعاتی مرند جدی و بحرانی است و اقدامات جدی برای مدیریت منابع آب توصیه می‌شود. لذا در صورت ادامه روند فعلی تخصیص و بهره‌برداری منابع آب، با توجه به تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت، افزایش میزان تقاضای محصولات کشاورزی و تغییر میزان احتمال آب دردسترس در سال‌های آینده، این سطوح ممکن است تغییر وضعیت داده و به سطح ریسک خیلی بالا (غیرقابل تحمل) نیز برسد که ادامه این روند کلیه سرمایه‌گذاری‌ها و مبانی اقتصادی این محدوده مطالعاتی را تهدید می‌کند. بنابراین پیشنهاد می‌شود با توجه به کاهش روزافزون منابع آب و کسری مخازن در این محدوده، نگاه سنتی مدیریتی به منابع آب از بین برود و ابتدا نسبت به تخصیص منابع آب به مصرف کنندگان مختلف، بالاخص بخش کشاورزی، طبق روش‌های مدیریتی و علمی نوین بازنگری صورت پذیرد تا هم سود اقتصادی بیشتر شده و هم مصرف‌کنندگان با بحران آب روبرو نشوند. همچنین با اتخاذ اقدامات لازم در صرفه‌جویی آب آبیاری، افزایش سطح کاشت محصولات زراعی مقاوم به کم آبی و در عین حال دارای سود آبیاری بیشتر (سود به ازاء هر واحد آب مصرفی) می‌توان فشار کمبود آب در منطقه را کاهش داده و از منابع موجود به صورت پایدار و بهینه بهره‌برداری کرد و ریسک کمبود آب در آینده را مدیریت کرد.

منابع

1- Askew A.J. 1974. Chance-constrained dynamic programming and the optimization of water resource systems. Water Resources Research 10(6): 1099–1106.

2- Bohle C., Maturana S., and Vera J. 2010. A robust optimization approach to wine grape harvesting scheduling. European Journal of Operational Research 200(1): 245–252.

3- Chen C., Huang G.H., Li Y.P., and Zhou Y. 2013. A robust risk analysis method of water resources allocation under uncertainty. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 27(3): 713–723.

4- Chung G., Lansey K., and Bayraksan G. 2009. Reliable water supply system design under uncertainty. Environmental Modelling and Software 24(4): 449–462.

5- Dai Z.Y., and Li Y.P. 2013. A multistage irrigation water allocation model for agricultural land-use planning under uncertainty. Agricultural Water Management 129: 69–79.

6- Gu W.Q., Shao D.G., and Jiang Y.F. 2012. Risk evaluation of water shortage in source area of middle route project for South-to North water transfer in China. Water Resources Management 26(12): 3479–3493.

7- Guo P., Huang G.H., He L., and Zhu H. 2009. Interval-parameter two-stage stochastic semi-infinite programming: application to water resources management under uncertainty. Water Resources Management 23(5): 1001–1023.

8- Haiyan W. 2002. Assessment and prediction of overall environmental quality of Zhuzhou City, Hunan Province, China. Journal of Environmental Management 66(3): 329-340.

9- Hashimoto T., Stedinger J.R., and Loucks D.P. 1982. Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation. Water Resources Research 18(1): 14–20.

10- He L., Huang G.H., and Lu H.W. 2008. A simulation-based fuzzy chance-constrained programming model for optimal groundwater remediation under uncertainty. Advances in Water Resources 31(12): 1622–1635.
11- Homayounifar M., and Rastgaripour F. 2010. Water allocation of Latian dam between agricultural products under uncertainty. Journal of Agricultural Economics and Development 24(2): 259-267. (In Persian with English abstract)
12- Huang G.H. 1996. IPWM: An Interval Parameter Water Quality Management Model. Engineering Optimization 26: 79-103.
13- Huang, G.H., Loucks, D.P., 2000. An inexact two-stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty. Civil Engineering Systems 17(2): 95–118.
14- International Water Management Institute. 2000. World water supply and demand. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.
15- Kataoka S. 1963. A stochastic programming model. Econometrica 31(1): 181-196.
16- Li M., and Guo P. 2015. A coupled random-fuzzy two-stage programming model for crop area optimization—a case study of the middle Heihe River basin, China. Agricultural Water Management 155: 53–66.
17- Li Q. Q., Li, Y. P., Huang G. H., and Wang C.X. 2018. Risk aversion-based interval stochastic programming approach for agricultural water management under uncertainty. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 32(3): 715-732.
18- Li W., Wang B., Xie Y.L., Huang G.H., and Liu L. 2015. An inexact mixed risk-aversion two-stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty. Environmental Science and Pollution Research 22(4): 2964–2975.
19- Li Y.P., Liu J., and Huang G.H. 2014. A hybrid fuzzy-stochastic programming method for water trading within an agricultural system. Agricultural Systems 123: 71–83.
20- Lu X., Li L.Y., Lei K., Wang L., Zhai Y., and Zhai M. 2010. Water quality assessment of Wei River, China using fuzzy synthetic evaluation. Environmental Earth Sciences 60(8): 1693-1699.
21- Maqsood I., and Huang G.H. 2003. A two-stage interval-stochastic programming model for waste management under uncertainty. Journal of the Air & Waste Management Association 53(5): 540–552.
22- Maqsood I., Huang G.H., and Yeomans J.S. 2005. An interval-parameter fuzzy two-stage stochastic program for water resources management under uncertainty. European Journal of Operational Research 167(1): 208-225.
23- Mardani M., Abdeshahi A., and Shirzadi Laskookalayeh S. 2020. Determining the Optimal Cropping Pattern with Emphasis on Proper Use of Sustainable Agricultural Disruptive Inputs: Application of Robust Multi-Objective Linear Fractional Programming. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production 30(1): 241-256.
24- Mardani M., Ziaei S., and Nikouei A. 2018. Optimal cropping pattern modifications with the aim of environmental-economic decision making under uncertainty. International Journal of Agricultural Management and Development 8(3): 365-375.
25- Nafarzadegan A.R., Vagharfard H., Nikoo M.R., and Nohegar A. 2017. Application of interactive interval linear programming for optimal water and crop area allocation considering virtual water content and socio-economic factors (Case study: Dorudzan-Korbal Plain). Iranian Journal of Ecohydrology 4(2): 601-613. (In Persian with English abstract)
26- Onkal-Engin G., Demir I., and Hiz H. 2004. Assessment of urban air quality in Istanbul using fuzzy synthetic evaluation. Atmospheric Environment 38(23): 3809-3815.
27- Regulwar D.G., and Gurav J.B. 2011. Irrigation planning under uncertainty-a multi objective fuzzy linear programming approach. Water Resources Management 25(5): 1387–1416.
28- Ruan B.Q., Han Y.P., Wang H., and Jiang R.F. 2005. Fuzzy comprehensive assessment of water shortage risk. Journal of Hydraulic Engineering 36(8): 906–912.
29- Sabuhi Sabouni M., and Mardani M. 2013. Application of robust optimization approach for agricultural water resource management under uncertainty. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 139(7): 571-581.
30- Sabuhi Sabuni M., Rastegari F., and Kahkha A. 2009. Optimal allocation of Torogh dam water between agricultural and urban sectors by an interval parameter fuzzy two stages stochastic programming under uncertainty. Economics and Agriculture Journal 3(1): 33-55. (In Persian with English abstract)
31- Safavi H.R., and Golmohammadi M.H. 2016. Evaluating the water resource systems performance using fuzzy reliability, resilience and vulnerability. Iran-Water Resources Research 12(1): 68-83. (In Persian with English abstract)
32- Singh A. 2015. Land and water management planning for increasing farm income in irrigated dry areas. Land Use Policy 42: 224–250.
33- Tabriz Regional Water Organization, Department of Equipment and Development of Agricultural Irrigation Networks. (2019). Selected Water Resources Data, Unpublished result. Tabriz, Iran.
34- Wang Y.Y., Huang G.H., Wang S., Li W., and Guan P.B. 2016. A risk-based interactive multi-stage stochastic programming approach for water resources planning under dual uncertainties. Advances in Water Resources 94: 217-230.
35- Yang L., Li A., and Bai H. 2011. Using Fuzzy Theory and Principal Component Analysis for Water Shortage Risk

Assessment in Beijing, China. Energy Procedia 11: 2085-2092.
36- Zhang C., Yue Q., and Guo P. 2019. A Nonlinear Inexact Two-Stage Management Model for Agricultural Water Allocation under Uncertainty Based on the Heihe River Water Diversion Plan. International Journal of Environmental Research and Public Health 16(11): 1884.
37- Zhang N., Li Y.P., Huang W.W., and Liu J. 2014. An Inexact two-stage water quality management model for supporting sustainable development in a rural system. Journal of Environmental Informatics 24(1): 52-64.

Journal of Agricultural Economics and Development
Vol. 35, No. 2, Summer 2021, p. 161-178

نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی
جلد ۳۵، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰، ص. ۱۷۸-۱۶۱

Water Shortage Risk Assessment Using an Interactive Two-stage Stochastic Programming Model (Case Study: Marand Basin)

J. Hosseinzad[1]*- M. Raei[2]
Received: 06-03-2021
Accepted: 18-05-2021

Introduction: In recent years, the problem of water scarcity is becoming one of the most challenging issues with the economic development and population growth that have involved many sectors due to its importance and economic status and has received increasing attention from governments and international research organizations. This emphasizes the need for optimal allocation of mentioned resources to balance socio-economic development and save water. Therefore, the aim of this study is to develop an uncertainty-based framework for agricultural water resources allocation and calculate the amount of water shortage after allocation and also risk evaluation of agricultural water shortage. The developed framework will be applied to a real case study in the Marand basin, northwest of Iran. Perception of the amount and severity of risk on the system can be a good guide in the optimal allocation of resources and reduction of damage.

Materials and Methods: Since various uncertainties exist in the interactions among many system components, optimal allocation of agricultural irrigation water resources in real field conditions is more challenging. Therefore, introduction of uncertainty into traditional optimization methods is an effective way to reflect the complexity and reality of an agricultural water resources allocation system. Among different methods, inexact two-stage stochastic programming (ITSP) has proved to be an effective technique for dealing with uncertain coefficients in water resources management problems. ITSP is incapable of reflecting random uncertainties that coexist in the objective function and constraints. Considering the risk of violating uncertain constraints and the stochastic uncertainty of agricultural irrigation water availability on the right hand side of constraints and uncertainties related to economic data such as the revenue and penalty in the objective function which are expressed as probability distributions, the CCP method and Kataoka's criterion are introduced into the ITSP model, thus forming the uncertainty-based interactive two-stage stochastic programming (UITSP) model for supporting water resources management. A set of decision alternatives with different combinations of risk levels applied to the objective function and constraints can be generated for planning the water resources allocation system. In the next step, on the basis of results of UITSP agricultural irrigation water shortage risk evaluation can be conducted by using risk assessment indicators (reliability, resiliency, vulnerability, risk degree and consistency) and the fuzzy comprehensive evaluation method.

Results and Discussion: A series of water allocation results under different flow levels and different combinations of risk levels were obtained and analyzed in detail through optimally allocating limited water resources to different irrigation areas of Marand basin. The results can help decision makers examine potential interactions between risks related to the stochastic objective function and constraints. Furthermore, a number of solutions can be obtained under different water policy scenarios, which are useful for decision makers to formulate an appropriate policy under uncertainty.

The results show that the dry season, i.e., July, August and September are the peak periods of water allocation and demand in Marand basin, which in these months, despite the higher water demand, the amount of water allocation in the current situation is less, which leads to more water shortages in these months. However, the results show that by increasing the efficiency of irrigation and water allocation using the developed framework, the amount of agricultural water allocation and demand is almost balanced and in addition to reducing water shortages, it leads to control over extraction from wells. Also, the goals of the regional water organization, which is reducing the amount of water allocated in the agricultural sector, will be achieved. Comparison with actual conditions shows that the allocation of water resources using the developed framework reduces water shortages while allocation becomes more efficient. Furthermore, the net system benefits per unit water increase which will demonstrate the feasibility and applicability of the developed framework. Results of evaluation of agricultural irrigation water shortage risks indicate that the water shortage risks in the Marand basin are in the category of serious or critical risk level. Therefore, if the current trend of allocation and exploitation of water resources continues, with the

1 and 2- Associate Professor and Ph.D. Student of Agricultural Economics, University of Tabriz, Tabriz, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: J.hosseinzad@tabrizu.ac.ir)
DOI: 10.22067/JEAD.2021.69061.1017

population growth, climate change, increasing demand for agricultural products and changing the probability of available water in the future, the water shortage risk would increase to the unbearable risk level. The continuation of this process threatens all investments and economic foundations of this study area. Therefore, the risk of water shortage in the future should be managed by improving the water-saving technologies and also changing the cultivation pattern to drought resistant crops.

Conclusion: In this study, an uncertainty-based framework for agricultural water resources allocation and risk evaluation was developed, including model optimization of agricultural water and risk evaluation of water shortage. The developed framework is capable of fully reflecting multiple uncertainties. The developed framework will be helpful for managers in gaining insights into the tradeoffs between system benefits and related risks, permitting an in-depth analysis of risks of agricultural irrigation water shortage under various scenarios. The assessment of agricultural water shortage risk based on the results of the optimization model helps decision makers to obtain in-depth analysis of agricultural irrigation water shortage risk under various scenarios. In application of the developed framework to Marand basin, series of results of agricultural water resources allocation expressed as intervals, and agricultural water shortage risk evaluation levels under different flow levels and also different combinations of risk levels are generated. Comparison between optimal results and actual conditions of agricultural irrigation water allocation demonstrates the feasibility and applicability of the developed framework. Results of evaluation of agricultural irrigation water shortage risks indicate that the water shortage risks in the Marand basin are in the category of serious or critical risk level. Therefore, effective risk management measures should be taken first for different irrigation areas of Marand basin.

Keywords: Fuzzy comprehensive evaluation, Interactive two-stage stochastic programming, Risk evaluation, Uncertainty, Water management

پیوست

جدول ۱- ماتریس ضرایب ارزیابی B برای محدوده مطالعاتی مرند

Table 1- The assessment coefficient matrix B of Mrand basin

کران پایین **Lower bound**
$B^{Lower}_{Marand,0.01,L} = W^{Lower} \times R^{Lower}_{Marand,0.01,L} = \{0.00, 0.00, 0.1547, 0.3721, 0.4732\}$
$B^{Lower}_{Marand,0.01,M} = W^{Lower} \times R^{Lower}_{Marand,0.01,M} = \{0.00, 0.1112, 0.1918, 0.3208, 0.4273\}$
$B^{Lower}_{Marand,0.01,H} = W^{Lower} \times R^{Lower}_{Marand,0.01,H} = \{0.00, 0.2223, 0.1477, 0.5249, 0.1051\}$
$B^{Lower}_{Marand,0.05,L} = W^{Lower} \times R^{Lower}_{Marand,0.05,L} = \{0.00, 0.0247, 0.3118, 0.3084, 0.3552\}$
$B^{Lower}_{Marand,0.05,M} = W^{Lower} \times R^{Lower}_{Marand,0.05,M} = \{0.00, 0.2100, 0.1855, 0.4312, 0.1733\}$
$B^{Lower}_{Marand,0.05,H} = W^{Lower} \times R^{Lower}_{Marand,0.05,H} = \{0.0988, 0.1482, 0.3068,0.3415, 0.1048\}$
$B^{Lower}_{Marand,0.1,L} = W^{Lower} \times R^{Lower}_{Marand,0.1,L} = \{0.00, 0.1359, 0.2565, 0.3641, 0.2435\}$
$B^{Lower}_{Marand,0.1,M} = W^{Lower} \times R^{Lower}_{Marand,0.1,M} = \{0.00, 0.2100, 0.3438, 0.3340, 0.1122\}$
$B^{Lower}_{Marand,0.1,H} = W^{Lower} \times R^{Lower}_{Marand,0.1,H} = \{ 0.1359, 0.1559, 0.3385, 0.3598, 0.0100\}$
کران بالا **Upper bound**
$R^{Upper}_{Marand,0.01,L} = W^{Upper} \times R^{Upper}_{Marand,0.01,L} = \{0.0662, 0.1544, 0.1191, 0.3915, 0.2687\}$
$R^{Upper}_{Marand,0.01,M} = W^{Upper} \times R^{Upper}_{Marand,0.01,M} = \{0.2096, 0.0110, 0.1582, 0.4478, 0.1733\}$
$R^{Upper}_{Marand,0.01,H} = W^{Upper} \times R^{Upper}_{Marand,0.01,H} = \{0.2206, 0.0758, 0.2460, 0.4189, 0.0387\}$
$R^{Upper}_{Marand,0.05,L} = W^{Upper} \times R^{Upper}_{Marand,0.05,L} = \{0.1655, 0.0552, 0.1798, 0.4547, 0.1449\}$
$R^{Upper}_{Marand,0.05,M} = W^{Upper} \times R^{Upper}_{Marand,0.05,M} = \{0.2206, 0.0217, 0.3348, 0.3849, 0.0380\}$
$R^{Upper}_{Marand,0.05,H} = W^{Upper} \times R^{Upper}_{Marand,0.05,H} = \{0.2206, 0.1083, 0.3650,0.3061, 0.00\}$
$R^{Upper}_{Marand,0.1,L} = W^{Upper} \times R^{Upper}_{Marand,0.1,L} = \{0.2206, 0.0217, 0.3084, 0.3881, 0.0612\}$
$R^{Upper}_{Marand,0.1,M} = W^{Upper} \times R^{Upper}_{Marand,0.1,M} = \{0.2206, 0.1083, 0.3824, 0.2887, 0.00\}$
$R^{Upper}_{Marand,0.1,H} = W^{Upper} \times R^{Upper}_{Marand,0.1,H} = \{ 0.2491, 0.3347, 0.3205, 0.0958, 0.00\}$